

Miskolci Egyetem
Műszaki Földtudományi Kar
Környezetgazdálkodási Intézet



Tudományos Diákköri Konferencia dolgozat
3D nyomtatott szűrők alkalmazásának lehetőségei a környezetiparban

Szerző: Kémenes Hortenzia

Hidrogeológus mérnöki Msc. II. évfolyam

Témavezetők: Székely István

Tudományos segédmunkatárs

Dr. Madarász Tamás

Egyetemi docens

Környezetgazdálkodási intézet

2022. Miskolc

Eredetiség nyilatkozat

Eredetiségi nyilatkozat Alulírott Kémenes Hortenzia, a Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karának hallgatója büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és aláírásommal igazolom, hogy ezt a dolgozatot saját magam készítettem, a benne leírt vizsgálatokat – ha ezt külön nem jelzem – magam végeztem el, és az ismertetett eredményeket magam értem el. Adatokat, információkat csak az irodalomjegyzékben felsorolt forrásokból használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Miskolc, 2022.

.....
hallgató aláírása

Konzulensi nyilatkozat

Alulírott Székely István, a Miskolci Egyetem Környezetgazdálkodási Intézetének tudományos segédmunkatársa és Dr. Madarász Tamás, a Miskolci Egyetem Környezetgazdálkodási Intézetének egyetemi docense a TDK dolgozatot beadásra alkalmasnak ítélik.

Egyéb megjegyzések, ajánlás

Miskolc, 2022.

.....
konzulens aláírása

.....
konzulens aláírása

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	4
2. 3D nyomtatás története	4
3. 3D nyomtatás elve, működése	6
4. 3D nyomtatás alkalmazási területei és alkalmazott anyagok.....	11
5. 3D nyomtatás alkalmazásának lehetőségei a környezetiparban	16
6. Laboratóriumi vizsgálatok	19
6.1 Szivárgási tényező meghatározása	21
6.2 Vizsgálati módszerek	21
6.2.1 Flexibilis falú permeabiméter	21
6.2.2 Merev falú állandó nyomású permeabiméter	22
6.2.3 Pásztázó elektromikroszkópia (SEM).....	23
7 Eredmények	24
8 Összefoglalás	27
9. Köszönetnyilvánítás	28
10. Irodalomjegyzék	28
11. Mellékletek	31

1. Bevezetés

Napjainkban a 3D nyomtatás az egyik legdinamikusabban fejlődő eljárás, amit szinte már majdnem minden iparágban előszeretettel és hatékonyan alkalmaznak. Nagyarányú elterjedését a nyomtatáshoz alkalmazható anyagok széles palettája, valamint az egyedi geometriák könnyű tervezhetősége biztosítja.

Dolgozatomban bemutatom a 3D nyomtatás legnépszerűbb ipari alkalmazási területeit, valamint a nyomtatás során alkalmazott anyagokat szakirodalmi adatok alapján. Tovább ismertetem azokat a lehetőségeket a környezetiparban, amelyek jelenleg is kutatás alatt állnak és még számos kiaknázatlan lehetőséget hordoznak magukban.

Az eddig ismert technológiai alkalmazások mellett, jelen tanulmányban bemutatom a hazai tulajdonú és az innovatív filamentek (nyomtatókhoz felhasznált anyagok) fejlesztésében nemzetközileg is élenjáró Filamania Kft-vel közösen megkezdett útkeresésünket azért, hogy a még kiaknázatlan környezetipari alkalmazások lehetőségét feltérképezzük. Külön fejezetben mutatom be azokat a laboratóriumi nyomtatási tesztek, alkalmazott anyagokat és áteresztőképesség vizsgálati eredményeket, amelyeket a Miskolci Egyetem Környezetgazdálkodási Intézetének talajvizsgáló laboratóriumában végeztem. A laboratóriumi vizsgálatok célja az, hogy a 3D nyomtatással tervezhető porozitású és áteresztőképességű mechanikai és fizikai-kémiai filtereket hozzunk létre. Ennek sikeressége érdekében a kutatás kiindulópontjaként ismert receptúrájú filamentek különböző nyomtatási beállításaiából (nyomtatási sebesség, hőmérséklet, kitöltés típusa, irányultsága) eredő paraméterek változékonyságának meghatározása volt a cél. A különböző nyomtatási beállítások mellett tervezett mintatestek porozitásának és áteresztőképességének meghatározásából egy olyan adatbázis készíthető, amely alapján a későbbiekben tervezhetővé válnak a megfelelő mechanikai szűrési tulajdonságokkal és funkciókkal ellátott szűrők.

2. 3D nyomtatás története

A 3D nyomtatás története évszázadokra nyúlik vissza, mégis új területnek tekinthetjük. A technológiát, amely a mai számítógépes 3D nyomtatás alapjául szolgál 1860-ban találta fel.

Francois Willème, francia festő, fotós és szobrász. 24 szögből készített fényképet tárgyakról, személyekről és így hozta létre a 3 dimenziós hasonmásukat.[1]

Az Amerikai Egyesült Államokban Joseph E. Blather térképész, térben ábrázolt szintvonalas térképeket 1892-ben. Blather feltalálását sok kísérlet követte, de nagy áttörést egyik sem okozott egészen az 1980-as évekig. [1]

A mai modern 3D nyomtatás kialakulása 1983- ra tehető, amikor Charles W. Hull feltalálta a sztereolitográfiát (SLA). Az eljárás célja, hogy UV fényben a folyékony polimerek megkeményednek. 1986-ban megalapította a 3D Systemet, amely mai napig piacvezető vállalat. [2]

A 80- as években több kutató is foglalkozott a témával. A Texasi Egyetem kutatója Carl Deckard megalkotta a lézeres szinterezést (SLS) 1987- ben. A találmány lényege, hogy lézersugárral megolvastja a porszemcséket. Ugyanebben az évben Scott Crump egy újabb eljárást dolgozott ki, a „szálolvastásos” módszert. A Fused Deposition Modeling (FDM) technológia a termoplasztikus anyagok rétegenkénti leválasztásán alapul. [3]

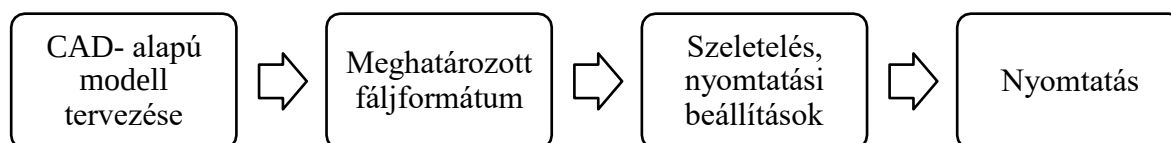
2000- es évek elejéig a 3D nyomtatást csak az iparban hasznosították, a magas költsége miatt. 2005- ben indult el egy kezdeményezés, amelynek a célja az olcsóbb nyomtatók gyártása volt, ezáltal lehetőséget teremtsenek a magánszemélyeknek is. A projekt neve a RepRap (Replicating Rapid Prototyper), amelynek alapját Scott Crump által kidolgozott „szálolvastásos” módszer adta. A 2000- es években sok hasonló törekvésre került sor. 2006- ban New Yorkban megalakult Makerbot Industries, amelynek alapját a RepRap projekt biztosította.

A kezdeményezések által egyre inkább elterjedtebbé válik a 3D nyomtatás.[1] Az 1980- as években kifejlesztett módszerek, napjainkban is a leginkább használatosak. [4]

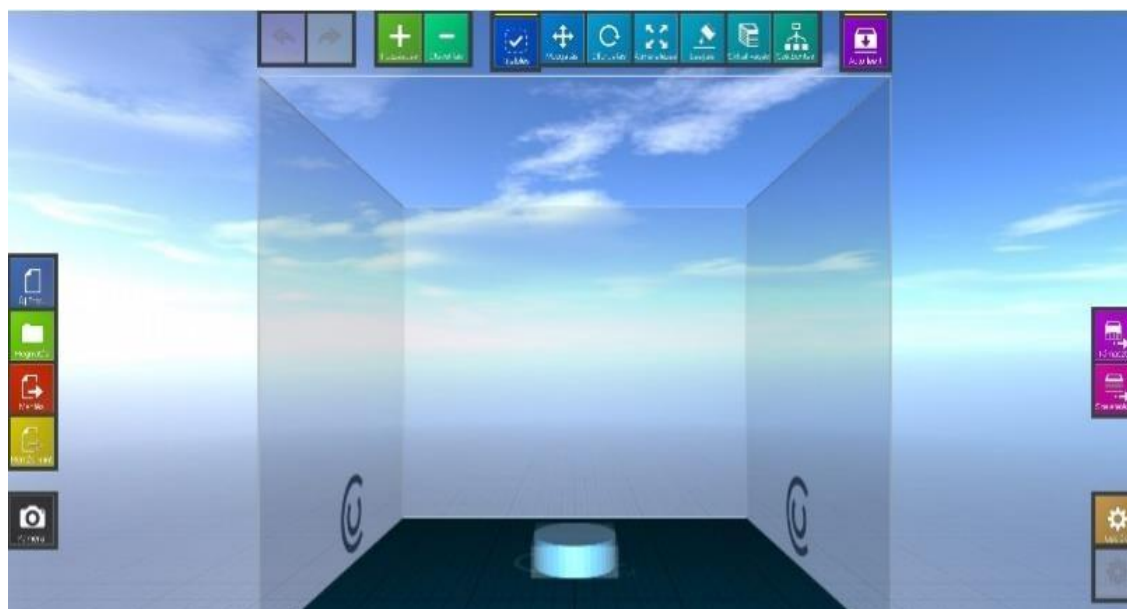
3. 3D nyomtatás elve, működése

A 3D nyomtatás egy additív gyártási technológia, vagyis rétegenkénti anyag hozzáadásával történik. Előnyösebb a hagyományos gyártási technológiákkal szemben, ahol egy tömbből faragják ki a kész terméket. [5] Ezáltal a 3D nyomtatás esetében kevesebb hulladék keletkezik és összetettebb geometriák kialakítása is lehetséges.

A 3D nyomtatás folyamatának első lépése egy CAD modell tervezése, majd a fájl meghatározott formátumban való mentése. Ezt követően a CraftWare szoftver a modellt vékony rétegekre szeleteli, majd meghatározza a nyomtatófej útját és a felhasznált anyag mennyiségét. A kiválasztott anyagból rétegről rétegre létrehozza a szoftverben tervezett modellt (1.ábra).[6]

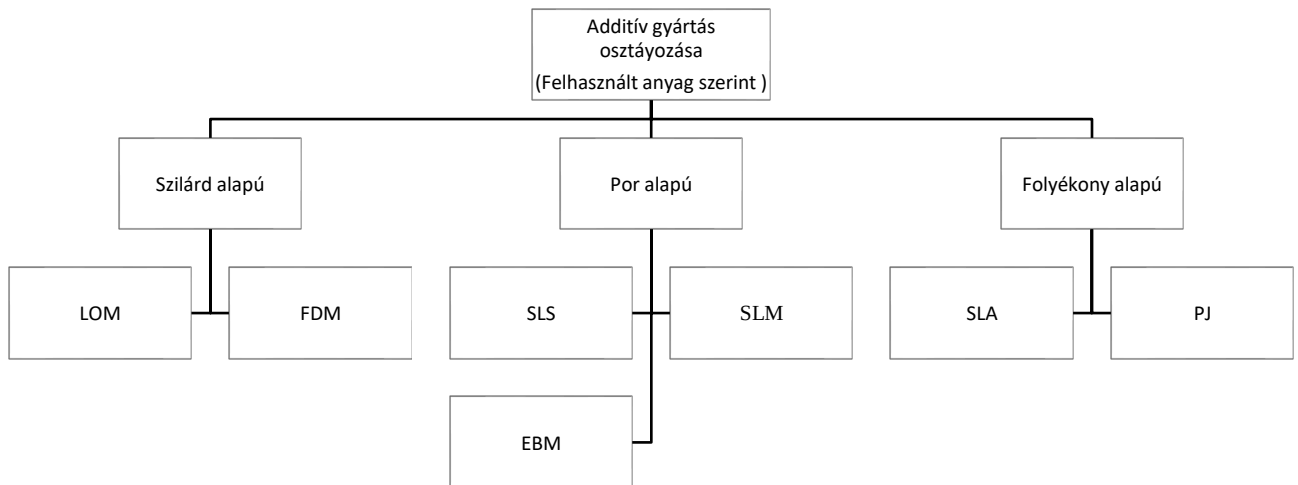


1. ábra - 3D nyomtatás folyamata [6]



2. ábra - 3D modell szoftveres megtervezése

A 3D nyomtatás fő alapelvei



3. ábra - 3D nyomtatás osztályozása (Felhasznált anyag szerint) [7]

3.1 1. Lemezelt darabgyártás (LOM - Laminated Object Manufacturing)

A technológia a laminálás elvén működik, amelynek a lényege, hogy a rétegeket egymáshoz ragasztjuk. A lapanyagokat vagy lemezanyagot egy görgő mozgatja. A munkasztalon egy lézer segítségével történik a termék kontúrjának vágása. Ezt követően egy felmelegített henger ragasztja össze a rétegeket. Egy réteg összeragasztás után a platform egy rétegnyit süllyed. Ez a folyamat addig ismétlődik, amíg elkészül a kívánt termék. [8]

A LOM eljárás előnye, hogy többféle anyag felhasználható, a kezelése egyszerű és éles sarkok is pontosan előállíthatóak.

Hátrányai közé tartozik, hogy a rétegvastagsága korlátozott, alacsony szilárdságú és drága a nyomtató berendezés. [9]

3.1.2 Huzalfelrakás vagy 3D extrudálás (FDM- Fused Deposition Modelling)

Napjainkban ez a legelterjedtebb 3D nyomtatási technológia. Anyaga minden esetben hőre lágyuló műanyag vagy termoplasztik lehet, amely 1,75 mm 2,85 mm átmérőjű szálban,

feltekercselve kerül forgalomba (filament). A szálát egy léptetőmotor mozgatja a meleg nyomtatófej felé, amely megolvasztja. Majd a megolvasztott anyag a fűvókán keresztül extrudálódik ki. Az extrudáló fej vízszintesen mozog a munkaasztal fölött. A következő réteg felvitelekor a munkaasztal süllyedve távolodik el a fejtől. Ez a folyamat addig ismétlődik, amíg az összes réteg nyomtatása elkészült.

Az FDM eljárás előnyei: széles alapanyag választás, berendezés könnyű üzemelése, könnyű felületkezelés. Állítható falvastagság és sűrűség, ami lehetővé teszi az erős, de könnyű alkatrészek gyártását. Olcsó alapanyag árak.

FDM eljárás hátrányai: kisebb pontosságú, éles sarkok nem nyomtathatóak vele. Lassú rétegépítés, ez a legidőigényesebb nyomtatási eljárás. A rétegek között hézag alakulhat ki, a nem megfelelő összeolvadás miatt.

3.1.3 Szelektív lézeres szinterezés (SLS - Selective Laser Sintering)

A szelektív lézeres szinterezés finomszemcséjű por állagú, hő hatására megolvasztható alapanyaggal dolgozik. Működésének elve, hogy a munkafelületén kívánt rétegvastagságban eltéríti az anyagot. Ezt követően a fölötte elhelyezkedő lézer a mozgó tükör segítségével végig pásztázza a modell geometriáját. A por ezáltal szintereződik, azaz felhevíti a porszemcsét, addig, amíg a közöttük lévő kémiai kötés létre nem jön. Ezáltal a szomszédos részecskék összekapcsolódva megszilárdulnak, ennek következtében kialakul a kívánt forma.

3.1.4 SLM (Selective Laser Melting) és EBM (Electron Beam Melting)

Az SLS elvén működő additív gyártási technológia. A szelektív lézeres megolvasztás (SLM) és az elektronsugaras megolvasztás (EBM) technológia annyiban különbözik, hogy az SLM lézerrel, míg az EBM nagy energiájú elektronsugárral működik.

3.1.5 SLA – sztereolitográfias gyártástechnológia

Ez a legrégebbi technológia (1986), amely a fotopolimerizáció elven működik. A lényege, hogy adott hullámhosszú fény hatására a folyékony halmazállapotú műanyag megszilárdul. A folyamat során a tárgy egy asztalon jön létre, amelyet a fotopolimerrel töltött kád felszíne alá helyeznek. A fény a folyadék felszínét pásztázza, majd modell területén a

fotopolimer szilárd halmazállapotúvá változik át. Ezt követően egyre mélyebbre süllyed a kádban. A nyomtatás során ez a folyamat ismétlődik, addig, amíg a végleges formáját eléri. [8]

Eljárás előnye: bonyolult geometriájú tárgyak és üreges szerkezetes is nyomtathatóak, polírozható, ragaszható.

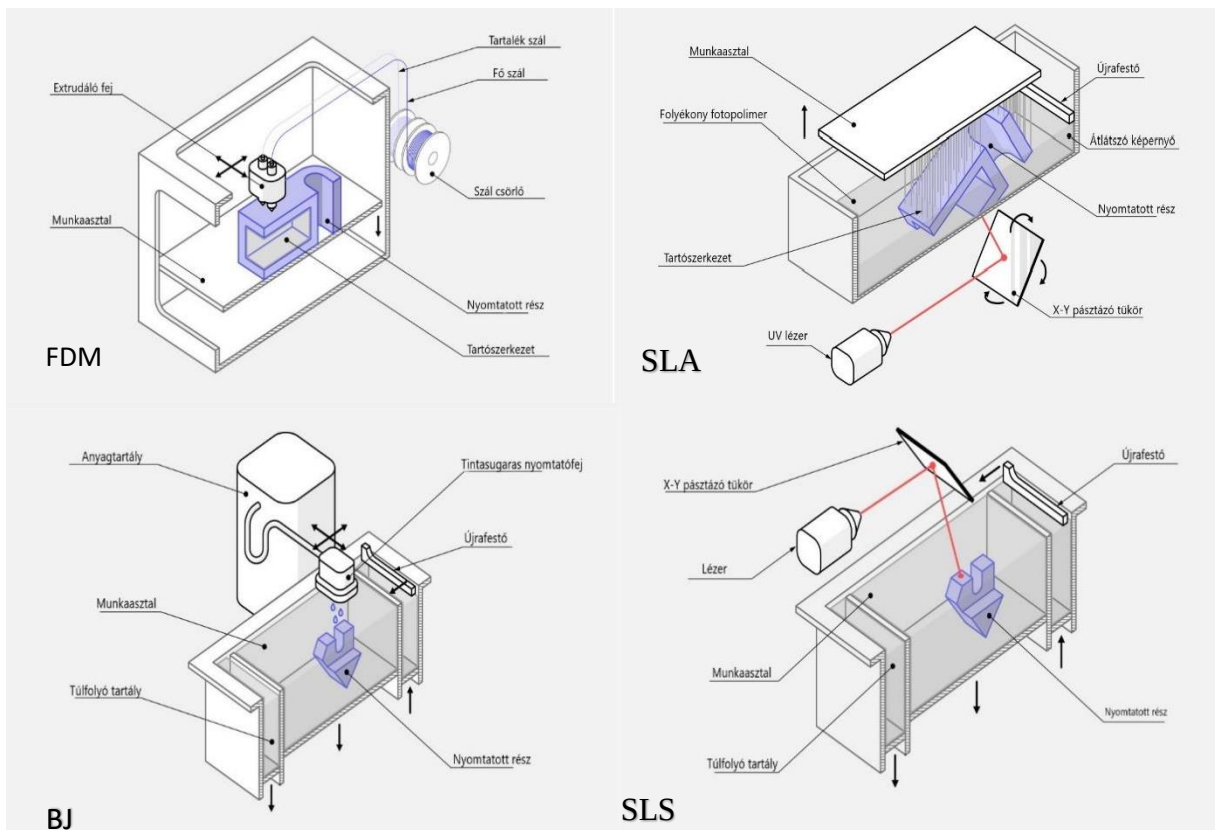
Hátránya: csak fotoérzékeny anyagok nyomtatására alkalmas, amelynek a szilárdsága alacsony. A termék zsugorodásra is alkalmas. A nyomtatók drágábbak, mint az FDM gépek.[9]

3.1.6 Fotopolimer jetting (PJ - PolyJet) és a binder jetting (BJ)

Mindkét eljárás igen pontos additív gyártási technológia közé tartozik. A fotopolimer jetting során folyékony fotopolimert kell csepegtetni a munkaasztalra. UV fény segítségével, a fotopolimer érintkezve a munkaasztallal, közvetlenül megszilárdul.

A binder jetting módszer annyival különbözik az előzőtől, hogy a nyomtatófejen keresztül jut át a kötőanyag a por állagú alapanyag összeolvasztásához.

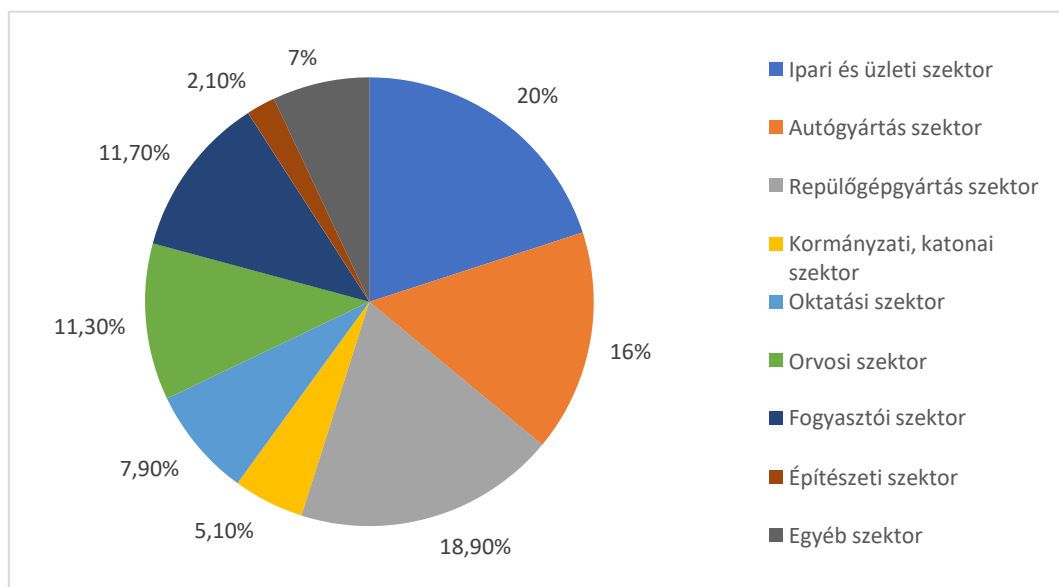
A fotopolimer és a binder jetting eljárás előnyei közé tartozik: nagy pontosság, jó kidolgozottság, sima felület és hosszú élettartam jellemzi. [8]



4. ábra - 3D nyomtatás technológiái [8]

4. 3D nyomtatás alkalmazási területei és alkalmazott anyagok

4.1 3D nyomtatás alkalmazási területei



5. ábra - 3D nyomtatás alkalmazásainak eloszlása az iparban [4]

4.1.1 Repülőgépipar

A 3D nyomtatás technológiája lehetővé tette a repülőgépek könnyű alkatrészeinek az előállítását. Alkalmazása jelentősen csökkenti az energiaigényt és az erőforrásokat is. Fontos, mivel a repülőgépben sok olyan alkatrész megtalálható, ami rendszeres cserét igényel (motor és hajtómű alkatrészei). Ezért a 3D technológia megfelelő megoldást jelent. Nikkel alapú ötvözetek a legideálisabb a szakítótulajdonsága, a korrózióállósága és a sérüléstűrése miatt.

[10] A NASA és a SpaceX is számos 3D technológiás projekteket finanszíroz. Legjelentősebb beruházása a “Rapid Analysis and Manufacturing Propulsion Technology (RAMPT)”, amelynek célja a rakétagyártás költségének és előállítási idejének a csökkentése.[11]

4.1.2 Autóipar

A 3D technológia lehetővé tette az autógyártás számára az új dolgok tervezését és a fejlesztését. A Local Motor 2014 -ben nyomtatta ki 3D technológiával az első elektromos autót.

A Local Motor az autón túl egy buszra is kifejlesztette a technológiát. Az OLLI névre hallgató busz rendkívül okos, elektromos, vezető nélküli és újrahasznosítható. Alkalmazás szempontjából a Ford tölti be a vezető szerepet, amely kiterjed a prototípusok és motoralkatrészek gyártására is. Összességében a 3D technológiának az autóiparban számos előnye van: költséghatékony, időhatékony, csökkenti az anyagpazarlást és lehetővé teszi az új tervek gyors tesztelését. [10]

4.1.3 Élelmiszeripar

Napjainkban egyre nagyobb igény mutatkozik a diétás ételek iránt. A 3D technológia lehetőséget ad a személyre szabott élelmiszerek létrehozásához, amelyben az egészséges összetevők aránya magasabb a felesleges összetevők arányával szemben. Ezáltal egészségesebben étkeznénk és testmozgás nélkül is hatékony a diéta. Az élelmiszergyártás tervezése számítógépen történik a megfelelő anyagok kiválasztásával különböző szerkezeteket és formákat hoz létre.

A 3D nyomtatási technológia az élelmiszeriparban egy megoldás lehet a jövőben az élelmiszerpazarlás ellen. Emellett nagy energiahatékonyság, költséghatékonyság jellemzi.[10]

4.1.4 Egészségügy

A történelem során először tapasztalható, hogy emberi testrészeket nyomtatnak, amelyeket életmentő műtéteken fel is használnak (szívátültetés, szövettranszplantáció). Előnye, hogy nem szükséges donor, ezáltal rövid időn belül több műtétet hajtanak végre. [11]

3D nyomtatási technológiával használható 3D bőr, gyógyszer és gyógyszerkutatás, csontok és porcok, szervek, rákkutatás és modellek nyomtatására oktatás szempontjából.[10]

4.1.5 Építőipar

Az építőiparban egyre elterjedtebbé válik a 3D technológia felhasználása, lakások, lakóépületek, hidak és viaduktok építésére. 2020 novemberében fejeződött be a projekt, amely a világ első lakóépületét nyomtatta ki COBOD nyomtatóval. Lehetséges több emeletű épület felépítése is a BOD2 nyomtatóval. A nyomtatóval akár 1m/s nyomtatási sebesség is elérhető. [11] Az építőiparban a 3D nyomtatásnak számos előnye van (gyors építés, alacsony költség, fenntartható és környezetbarát szerkezetek, kevesebb hulladék). Azonban a sok előnnyel

ellentétben számos kockázat is fenyeget (3D nyomtatási anyagkockázat, 3D nyomtató berendezésének a kockázata, építési és környezeti kockázat).[12]

4.2 3D nyomtatás alkalmazott anyagai

3D nyomtatáshoz nem elegendő a geometria megtervezése, a legjobb minőség eléréshez elengedhetetlen a megfelelő anyag kiválasztása is, ami a nyomtatott tárgy funkcióinak ellátásához leghatékonyabb. Az alábbiakban összegyűjtöttem és bemutatom a 3D nyomtatásban leggyakrabban alkalmazott anyagokat és azok alkalmazási körét.

4.2.1 Fémek és ötvözetek

A fémnyomtatás célja az anyag megolvasztása. A fémből és ötvözetből történő 3D nyomtatás megkönnyíti az összetett formák létrehozását. Leginkább az autóiparban, repülőgépiparban, orvostudományban és a gyártóiparban használják.

Leggyakrabban használt fémek és ötvözetek: alumínium, nikkel, kobalt, titán és a rozsdamentes acél. A kobalt alapú ötvözetet a fogászatban hasznosítják. Ennek oka a nagy fajlagos merevsége, rugalmassága és a tartóssága. [13] Nikkel alapú ötvözeteket repülőgép alkatrészek gyártására alkalmaznak, a nagy korrózióállóság és a hőtűrése miatt, amely 1200 °C-ig is ellenáll. 3D nyomtatással titán alapú ötvözetek nyomtatása is lehetséges. Repülőgépgyártásban és az orvosbiológiai iparban alkalmazzák, a nagy igénybevétel és a magas hőmérséklettel szembeni ellenállása miatt. [10]

4.2.2 Kompozitok

Kompozitoknak olyan anyagokat nevezünk, amelyek különböző kémiai és fizikai jellemzőkkel rendelkező komponensekből állnak. A szilárd anyagokat három fő csoportba lehet sorolni: fém, polimer és kerámia. A csoportok keveredését nevezzük kompozitoknak, amelyben az alkotó részek jól elkülönülnek egymástól és saját részeket alkotnak.

Összetételük alapján lehetnek:

- Kerámia - fém
- Kerámia – polimer
- Fém – polimer

A kompozitok az additív gyártásban egyre elterjedtebbek, a költséghatékonyság, jobb tulajdonság és a könnyű elérhetőségük miatt. Számos iparág alkalmazza: repülőgépgyártás, egészségügy, orvosbiológia és az autógyártás.[13]

A kompozitok tulajdonságát használja ki a Filaticum Technical is, nyomtatószálak alapját többnyire PLA mátrix adja és a hozzáadott speciális adalékanyag, amely az iparágak igényeit tartja szem előtt.

A Filament Technical szálak lehetnek:

- polimermátrixba üvegszál (Filaticum Engineering)
- polimermátrixba szénszál és szénpor (Filaticum ESD. Conductive)
- polimermátrixba gipsz (Filaticum Essence, Model, Gypsum). [14]

4.2.3 Polimerek

A polimer a 3D nyomtatás legelterjedtebb és legszükségesebb anyaga. Ennek oka a költséghatékonyság, a széleskörű elérhetőség, jó mechanikai tulajdonság és nyomtatási technikákhoz való alkalmazkodás. Leggyakoribb polimerek: nylon, akrilnitril-butadién - sztírol (ABS), polietilén-tereftalát (PET), ütésálló polisztirol (HIPS), polikarbonát (PC), polilaktikus sav (PLA), termo-műanyag poliészter (TPC) és poliéter-éter-keton (PEEK). [13]A műanyag alapanyagon kívül színezőanyagot és a nyomtatást segítő adalékanyagot tartalmaznak. [9]

Alkalmazási területei az autógyártás, repülőgépgyártás és az egészségügyi szektor.

4.2.4 Kerámia

3D technológiával már kerámia anyagból is lehet jó minőségű tárgyakat nyomtatni. A kerámia kemény, törekeny, korrózióálló és hőálló anyag. A kerámiák 3D nyomtatásával bármilyen geometriai tárgy nyomtatható, ezt a keményedésüket megelőző folyékony állapotuk teszi lehetővé.

Kerámia anyagának alkalmazása fontos a fogászatban és a repülőgépgyártásban. [13] Ilyen anyagok közé sorolható az alumínium-oxid, a bioaktív üvegek és a cirkónium-oxid. Az alumínium-oxid felhasználása igen széles körű, katalizátorok, abszorbensek, mikroelektronika, vegyi anyagok és számos ipar gyártásában is szerepe van. A cirkónium-oxid az atom-energia iparágban az egyik legfontosabb anyag, az elemcsövek gyártásához. Legalkalmasabb a

hafniummentes-cirkónium, melynek alacsony a sugárzási érzékenysége és a termikus neutronelnyelése is. [10] A 3D nyomtatásban a kerámiát csak korlátozottan használják a méretpontatlansága és a rossz felszíni polírozása miatt.

4.2.5 Bioanyagok

A bioanyagokat leginkább az egészségügyi szektorban alkalmazzák, a nyomtatási pontosság, bonyolult geometria kivitelezése, költséghatékonyság és alacsony anyagpazarlás miatt. Bioanyagokból készülnek az orvosi berendezések, implantátumok, szervek, sejtek stb. A 3D nyomtatásban többféle bioanyagot használnak fel: orvosbiológia fém (Ti ötvözet, Co-Cr ötvözetek, rozsdamentes acél, stb), orvosbiológia polimer anyagok (PEEK) és orvosbiológiai kerámia

4.2.6 Okos anyagok

Okos anyagoknak azokat nevezzük, amelyek hő, fény és nyomás hatására megváltoztatják a fő tulajdonságaikat (szín, méret, alak). A robotikában, egészségügyi szektorban (orvosbiológiai implantátumok), illetve a művészetben alkalmazzák. Kétféle okos anyagot különböztetünk meg: alakmemóriás polimer és az alakmemóriás ötvözet (pl: Ni-Ti). [13]

4.2.7 Élelmiszernyomtatási anyagok

A 3D nyomtatási technológiát az élelmiszeripar is alkalmazza, amely ételmet állít elő emberi fogyasztásra. Képes az ételek sajátos formáját és geometriáját előállítani, mint pl: csokoládé, spagetti, pizza és más ételek. A jövőben alternatív megoldás lehet az ételpazarlás csökkentésére.

4.2.8 Épület anyagok

A jelenlegi 3D technológia lehetőséget biztosít a beton nyomtatásra, ami az építkezések nélkülözhetetlen anyaga. Ezáltal nyomtathatóak a hidak, házak, illetve többszintes épületek is. Az épületek 3D nyomtatásával csökkenthető az anyagpazarlás, az építkezési költség, a személyzet és az idő is. Az infrastruktúra és az építkezés alkalmazza az épület anyagok 3D nyomtatását.

4.2.9 Speciális anyagok

Speciális anyagok közé tartozik fotopolimer, fa, üveg és a cellulóz vegyületek. A sokszínű anyagok miatt az alkalmazási területe is széleskörűbb. Az egészségügyi szektorban, elektronikában, bútoriparban és az ékszer és ruhaiparban is alkalmazzák [13]

5. 3D nyomtatás alkalmazásának lehetőségei a környezetiparban

A 3D nyomtatás viszonylag még új technológia és a területen végzett kutatások korlátozottak. A vízszűréshez és -kezeléshez hagyományos membránokat alkalmaznak. 3D technológiával még tényleges membránok előállítása nem lehetséges. A membrántechnológia lényege a víz minőségének javítása és az újra felhasználása. A víziparban fontos szerepet töltene be a fokozott vízhiány miatt. Kutatások bizonyították, hogy a hagyományos vízkezelés egyes szennyeződések esetében nem hatékony és fertőtlenítés során is káros vegyületek keletkezhetnek. [15]

Az elmúlt időszakban megnőtt az érdeklődés a 3D technológiával nyomtatott vízkezelési/tisztítási membránleválasztók iránt.

5.1 Membránok alkalmazása szűréshez és vízkezeléshez

A membrántechnológia dinamikusan fejlődik és számos hagyományos vízkezelési formát felváltott a hatékonysága és a költséghatékonysága miatt. A membránok többsége polimerből készül, de létezik kerámiából is. A 3D nyomtatás ígéretes a membrángyártáshoz a pontos struktúrák és a méretarányok miatt. [16]

Membrán vízkezelés szempontjából egyre fontosabb a megnövelt teljesítmény, amelyet 3D nyomtatással lehetséges fokozni. A nyomtatás pozitív előnyei miatt egyre több technológiát dolgoznak ki. A szingapúri Nano Sun cég 3D nyomtatott nanoszálal vízszűrő membrángyártással foglalkozik. A gyors fejlődés miatt elengedhetetlen a legújabb kutatások elemzése. [17]

5.2 Kapszulák - biohordozók szennyvízkezeléshez

A szennyvizek a mikroorganizmusok, gyógyszerek és különböző vegyületek forrásai, amelynek eltávolítása nehézkes a hagyományos szennyvíztisztító rendszerekkel. A ferrát (VI)

kémiai oxidációjával nagy hatékonyságot mutat. Azonban az előállítása nagyon költséges és nedves környezetben igen instabil. A ferrát kapszula formában lévő előállítása során stabilabb, költséghatékonyabb és a kioldása is szabályozhatóbb lenne. 3D nyomtatással potenciálisan tárolható lenne. A mai technológiával még nem állítható elő, mivel a kapszula nyomtatása után töltik fel ferráttal. Mozgóágyas biofilm reaktorokat világszerte alkalmazzák szennyvíztisztításra egyszerű hatékonyságuk miatt. [16]

5.3 Szorbensek - Szubsztrátok olaj és víz elválasztásához

Nagyon fontos környezeti probléma az olajkitermelés és szállítás során az olajkiömlés és -szennyezés. A porózus membránszerkezetek, mint szorbensek ígéretes módszernek mutatkoznak a hatékonyság és az újrahasznosítás szempontjából. A nedvesíthetőségének és a nagy felület - térfogat arányának köszönhetően az olajat átengedi, míg a vizet visszatartja. Előállításuk nagyon időigényes, ennek érdekében a 3D nyomtatással előállított porózus membránszerkezetek előállítását javasolják. [16]

A vizsgálatok nagyon magas hatékonyságot értek el a víz és olaj leválasztás céljából a szubsztrátum felülettel. Hidrofób nanoszilícium - dioxidot tartalmazó polidimetilsziloxán (PDMS) tintát használtak a 3D nyomtatáshoz, amely nagy szilárdságot és könnyű nyomtathatóságot biztosít. Ez által 99,6%-os hatékonyságot értek el 0,37 mm-es pórusmérettel. Egy újabb leválasztáshoz a természetben található kaktuszból merítettek ihletet, a bioinspirált PDMS szivacs. A szivacs közepén üreg van, amely olajtároló helyként szolgál, közel 4 nagyságrenddel nagyobb az abszorpciós kapacitása, mint a hagyományos PDMS szivacsoknak.[18]

3D technológia előállítása lehetővé teszi a belső és a felső -szerkezet szabályozását (érdesség), amely szubhidrofób vagy oleofil felületet hozhat létre. A sok előnye ellenére, még korlátozott a nyomtatás felbontása és a felhasznált anyagok palettája, főleg az olaj és víz elválasztásához. A 4D nyomtatás érdekes lehet a szorbensek számára, ahol különböző külső ingerek (ph, hőmérséklet stb.) aktiválják az intelligens szűrőket. [16]

5.4 Adsorbensek nehézfémek adszorpciójához

A nehézfémek (réz, ólom, kadmium, higany) vízből való eltávolítása nagyon fontos a mérgező hatásuk miatt. Az élő szervezetben való felhalmozódásuk egészségügyi károsodást

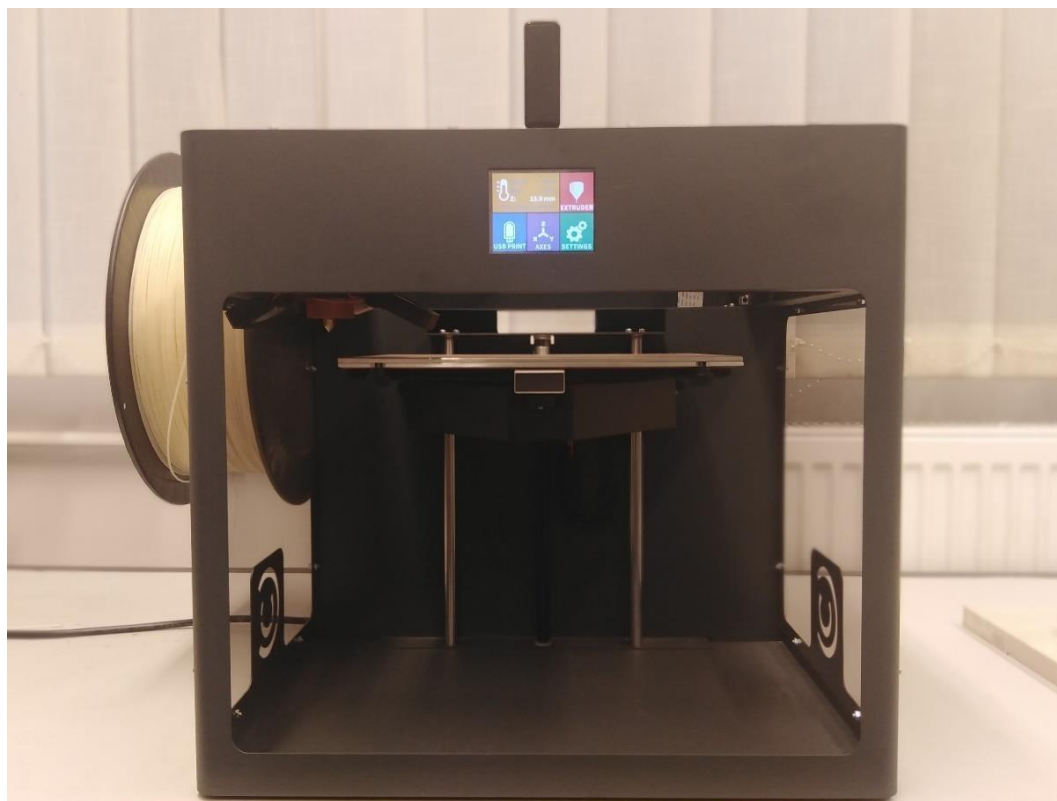
okozhat, ennek megelőzése érdekében elengedhetetlen az eltávolításuk. Ilyen módszerek az aktív szén, szén nanócsövek vagy a bio anyagok. A biológiailag lebomló anyagok a hatékonyságuk és az alacsony költségük miatt előnyösek. Ilyen a kitozánhidrát, amely képes adszorbeálni a nehézfémeket, de nehézkes az újrafelhasználhatósága. A 3D nyomtatás számos lehetőséget biztosít nehézfémek eltávolításához, ilyenek a hidrogél, a szűrők és a szorbensek. 3D nyomtatási technológiával precíz szerkezetek előállítására is alkalmas. A nehézfémek eltávolítására bonyolult szerkezet létrehozása és pontos belső szerkezet szükséges. [16]

5.5 A víz sótalanítása

Az egyre növekvő népesség következtében egyre fontosabbá válik a rendelkezésünkre álló víz alacsonyabb költségű felhasználása. A vízkészlet legnagyobb %-át a sós tengervíz teszi ki. A klasszikus sótalanítási lehetőség a termikus és membrán alapú sótalanítás módszereken alapul. A termikus módszer esetén a párolgás kondenzáció úján keletkezik, hátrányának tekinthető a magas CO_2 kibocsátás, és az energiától való függőség (szén és a fosszilis tüzelőanyagok). A membránalapú sótalanításnál szelektív transzport útján választják le az oldott sóionokat egy félig áteresztő membránon át hőmérséklet, nyomás vagy potenciálkülönbség hatására. A membránalapú sótalanítás környezetvédelmi szempontból sokkal előnyösebb. A 3D nyomtatás a termikus sótalanítási technológiát energiahatékonyság szempontjából javította. Precíz alkatrészek és funkciók állíthatóak elő, amelyek bírják a hőmérséklet, - nyomás -és tengervíz változó összetételét. [19]

6. Laboratóriumi vizsgálatok

A kutatásom célja 3D nyomtatással, adott geometriájú és térszerkezetű vízipari szűrők előállítása volt. 3D nyomtatáshoz szükséges filamenteket gyártó céggel együttműködve, a különböző nyomtatási beállításokból eredő, a minták víz áteresztő képességét befolyásoló paramétereket vizsgáltam. A 3D technológiával nyomtatott mintákon végzett szivárgási tényező méréseket a Miskolci Egyetem Környezetgazdálkodási Intézetének talajvizsgáló laboratóriumában végeztem. A mintatestek előállítására egy CraftBot Plus típusú nyomtatót használtam (6. ábra).



6. ábra - CraftBot Plus nyomtató (A szerző saját szerkesztése)

A vízszűrők anyagának kétféle filament típust választottam, amelyek a Filaticum PLA és Filaticum Foam voltak. A Filaticum nyomtatószálak az összes elterjedt FDM/FFF technológián alapuló nyomtatóban alkalmazható.

A Filaticum PLA bio - kompozit termékek. A 3D nyomtatási feladatot elősegítő, a kész tárgy színét, illetve mechanikai tulajdonságok módosítását is tartalmazza. Ilyen összetevők

lehetnek, a töltőanyagok (pl. gipsz), külső, belső csúsztató vagy folyást befolyásoló adalékanyagok. Ennek köszönhetően könnyebben, gyorsabban és alacsonyabb hőmérsékleten is nyomtathatóak a tárgyak.

A Filaticum Foam szál szivacsos és habos szerkezetből épül fel. Előnye más nyomtatószálakhoz képest, hogy a habszerkezetének köszönhetően könnyű és a felülete is nagyon sima. Alkalmazási területe széles körű, ahol szükség van könnyű 3D technológiával nyomtatott tárgyra, ilyen pl: autóipar, modellezés, öntészet, hajó, repülőgép – drón gyártásában is. Illetve kitöltő anyagként is alkalmazható. Különböző sűrűségű és szerkezetű tárgyak készíthetők különböző jellemzők beállításával, mint például a hőmérséklet (190-250 °C), filament adagolás (40-120 %), sebesség: (20-100 mm/s), fűvóka méret: (0,2-1 mm). A legkönnyebb hab magas hőmérsékleten, kis adagolással és alacsony sebeséggel érhető el. Mindkét anyagtípust természetes anyagokból állítják elő. [14]

A filamentek különböző nyomtatási beállításáiból adódó paraméterek (nyomtatási sebesség- hőmérséklet, kitöltés típusa- irányultsága) változásainak vizsgálatával foglalkoztam. Azonos magasságú (1,6 cm) és átmérőjű (4,6 cm) szűrők kerültek nyomtatásra. A porozitás és a sűrűség meghatározása a térfogat és a tömeg ismeretében került kiszámításra. A mintatestek szivárgási tényezőjét merev falú állandó nyomású permeabiméterrel és flexibilis falú permeabiméterrel mértem meg.



7. ábra - Nyomtatott mintatestek (A szerző saját szerkesztése)

6.1 Szivárgási tényező meghatározása

A szivárgási tényező (k) a felszín alatti rétegek egyik legfontosabb jellemzője, a kőzetek vízvezető tulajdonságát kifejező paraméter. Egyaránt jellemzi a fluidumot és a közeget is, amelyben a folyadék áramlik. Mértékegysége: [m/s] vagy [m/nap]

A szivárgási tényező meghatározása alapvetően háromféleképpen történhet:

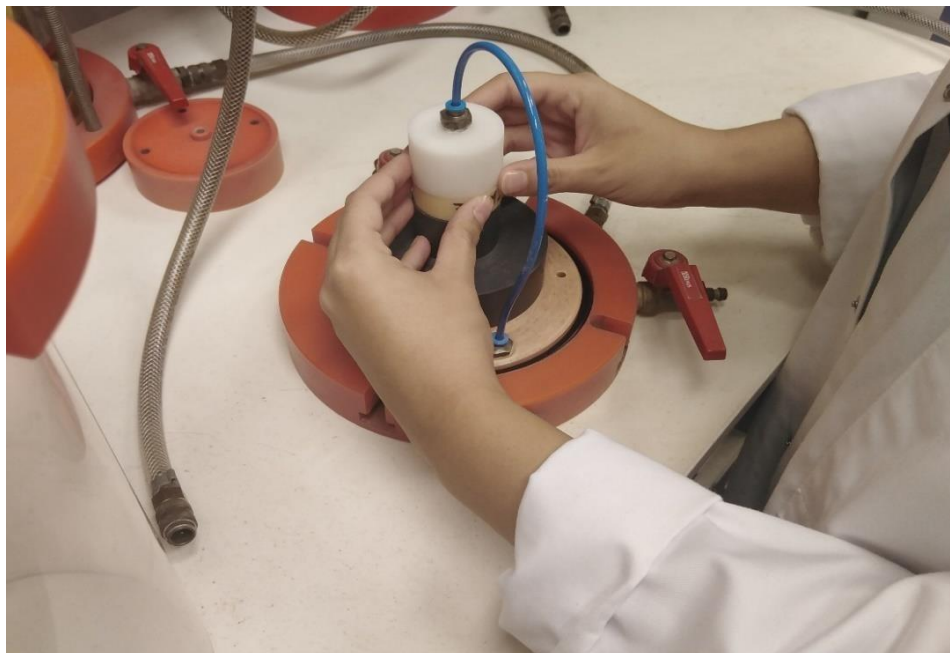
- szivárgási tényező meghatározása számítással
- szivárgási tényező meghatározása laboratóriumban
- szivárgási tényező meghatározása terepen (in situ) [20]

6.2 Vizsgálati módszerek

6.2.1 Flexibilis falú permeabiméter

Kisebb szivárgási tényező meghatározásánál alkalmas. Előnye, hogy elkerülhető vele a minta és a mintatartó edény fala közötti szivárgás.

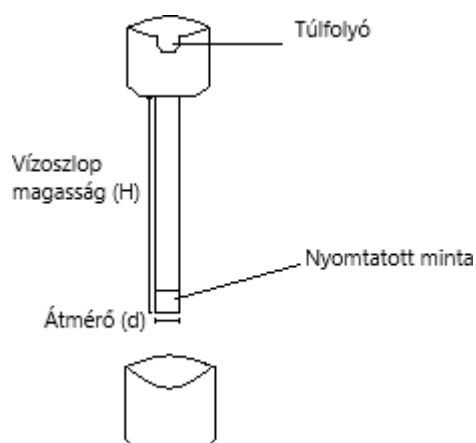
A mintákat beépítjük a készülékbe, majd telítjük. A vízzel való feltöltést követően, cellanyomást-mérő nyomásszabályozóval beállítjuk az oldalnyomást. A víznyomás-mérő nyomásszabályozóval a hidraulikus gradiens értékét állítjuk be. A bürettárolól leolvasott értékek által számítható ki a szivárgási tényező.



8. ábra - Flexibilis falú permeabiméter beépítése (A szerző saját szerkesztése)

6.2.2 Merev falú állandó nyomású permeabiméter

A merev falú állandó nyomású permeabimétert, jó átteresztőképességű minták vizsgálatakor alkalmazzák. Az elvi vázlata az 9. ábrán látható. Amely alapján beépített mintán keresztül vizet áramoltatunk állandó nyomáskülönbség mellett. [20]



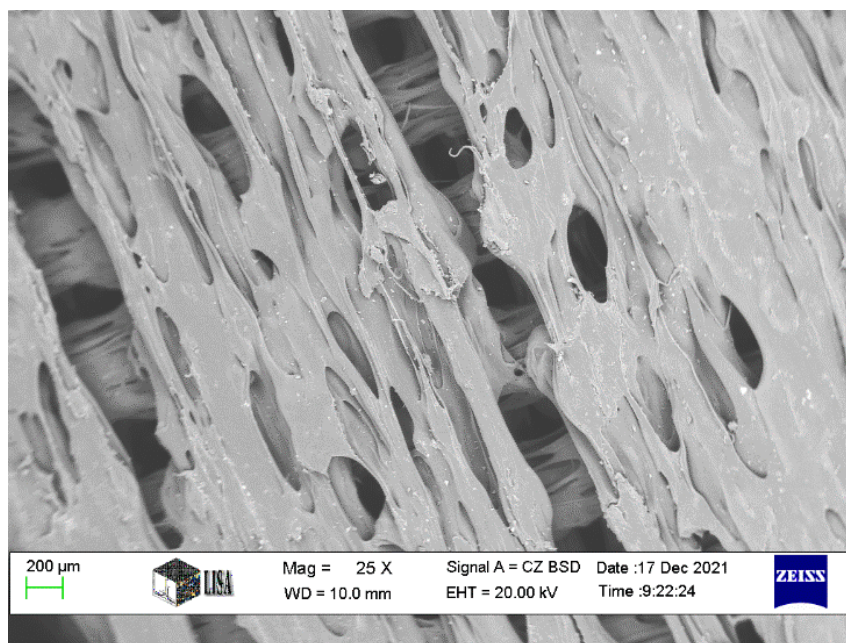
9. ábra - Merev falú állandó nyomású permeabiméter (A szerző saját szerkesztése)

6.2.3 Pásztázó elektronmikroszkópia (SEM)

A tudomány fejlődésével az optikai mikroszkóp felbontóképessége nem volt elegendő, ennek következtében újabb technológiát fejlesztettek ki, amelynek hullámhossza rövidebb a fénynél.

A pásztázó elektronmikroszkópot (scanning electron microscope) az 1935- ben találta fel Max Knoll, ennek ellenére a kereskedelemben csak az 1960-as években jelent meg. [16] A mikroszkópban vákuum alatt felgyorsítják az elektronokat. A gyorsan mozgó elektronokból képzett nyalábot fókuszálják meg, ez a nyaláb a tárgyon abszorbeálódik vagy szétszóródik, és a tárgyat leképezi.

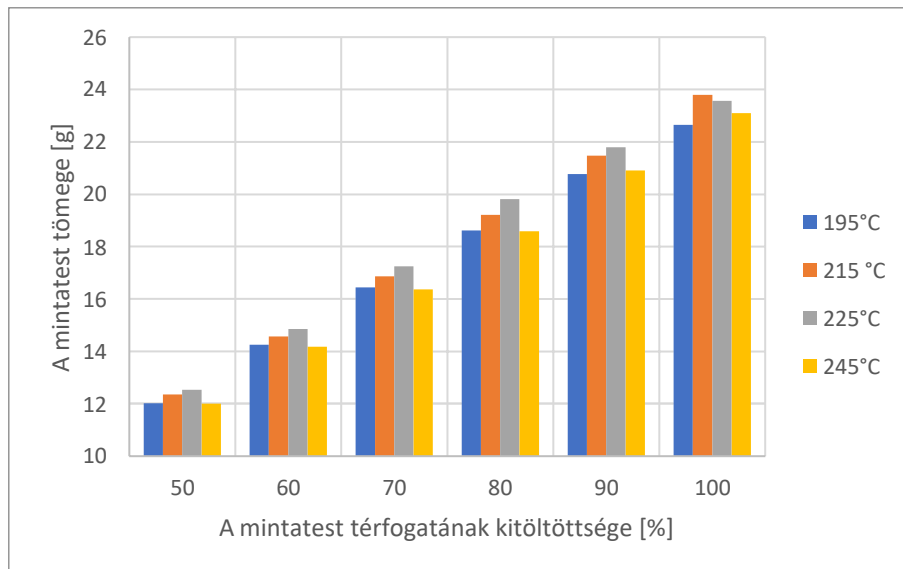
A pásztázó mikroszkóp felhasználását tekintve igen széleskörű: agyagtudományban, biológiában, földtani minták elemzésében is.



10. ábra - Pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) felvétel a habosodó szerkezetről [22]

7 Eredmények

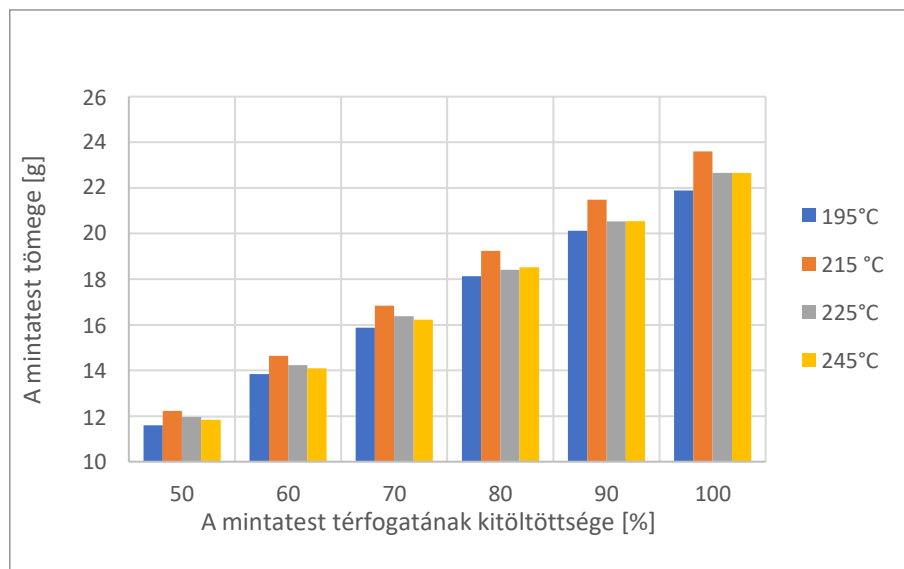
Az 11. és 12. ábrákon a Filaticum Foam 3D nyomtatással előállított minták tömegének a változása látható, kitöltés típusának függvényében. A párhuzamos vonalak és a 45° -os kitöltöttségi típus esetében is 195 °C, 215 °C, 225 °C és 245 °C nyomtatási hőmérsékleten készültek. A hőmérséklet növekedésével a sűrűség csökkenthető.



11. ábra - A tömeg változása térfogati kitöltöttség függvényében párhuzamos vonalak esetében

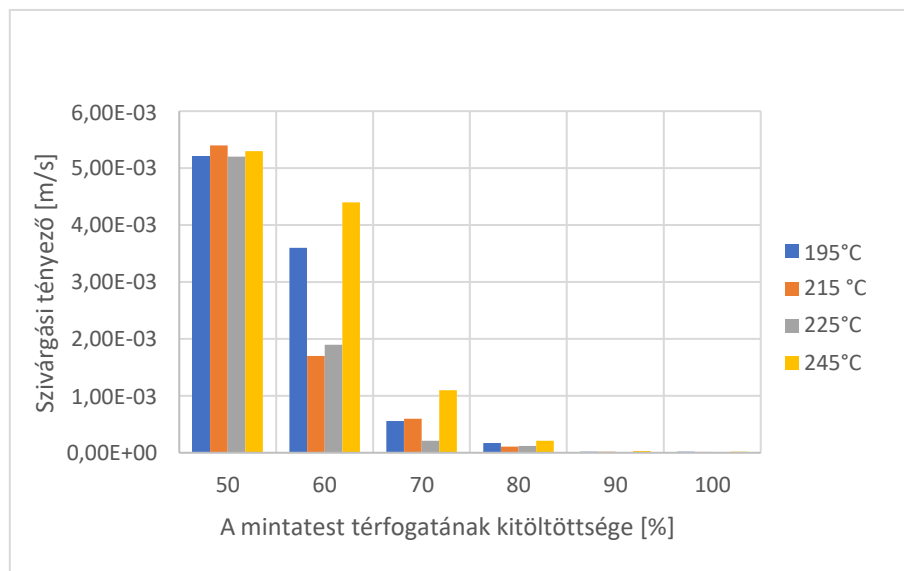
(saját szerkesztésű ábra)

A Filaticum Foam habosodó szerkezetének köszönhetően ugyanolyan nyomtatási beállítások mellett jóval kisebb sűrűségű mintatestek előállítása lehetséges. Ennek egyik oka, hogy míg a Filaticum PLA testek csak szimplán a térfogat kitöltöttségéből eredően porózusak, addig a Filaticum Foam esetében a habosodás következtében válnak kettős porozitású rendszerre. Ugyanakkor az is látható, hogy a hőmérséklet növelésével (245 °C) a mintatestek sűrűségét tovább csökkenthető. Ez azzal magyarázható, hogy a magasabb hőmérséklet hatására az anyag időben később szilárdul meg, így több ideje van a habosodásra és lesz porózusabb a szerkezete.



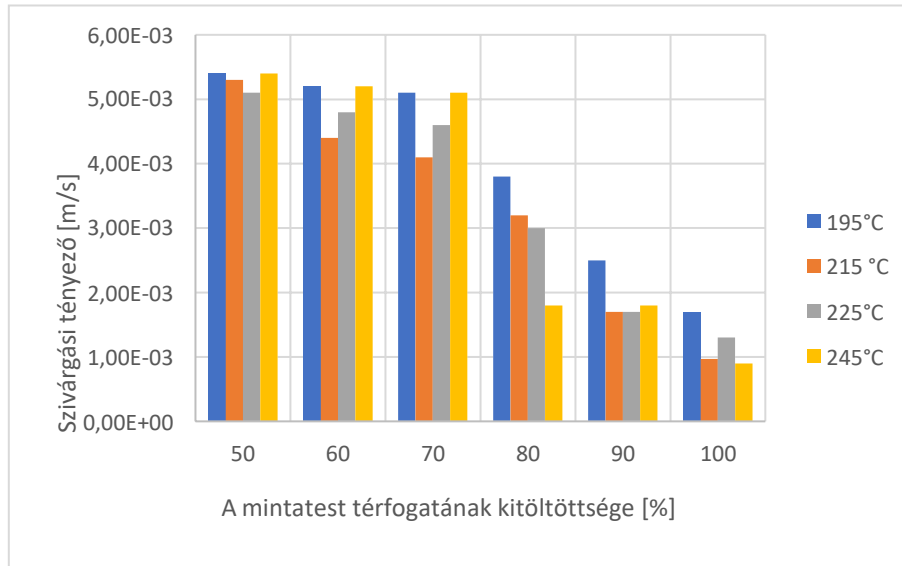
12. ábra - A tömeg változása térfogati kitöltöttség függvényében 45 fokos kitöltés esetén
(saját szerkesztésű ábra)

A hőmérséklet növelésével járó intenzívebb habosodás következtében a szivárgási tényező értékek is értelemszerűen nőnek (13. ábra). Megfigyeltük, hogy a másodlagos porozitás csak bizonyos térfogat kitöltöttség mellett játszik szerepet. Az 50%-os térfogat kitöltöttség mellett a másodlagos porozitás kevésbé jelentős és a 80% fölötti térfogatkitöltöttség esetében is a 195 °C-on és a 245 °C-on nyomtatott Filaticum Foam mintákközel azonos szivárgási tényező értékeket adtak. Ennek oka, hogy az általunk alkalmazott fúvókaméret (0,4 mm) már nem elég precíz a tervezett rétegek nyomtatására a túl vastag extrudált szálak miatt.



13. ábra - Szivárgási tényező változása térfogati kitöltöttség függvényében párhuzamos vonalak esetén
(saját szerkesztésű ábra)

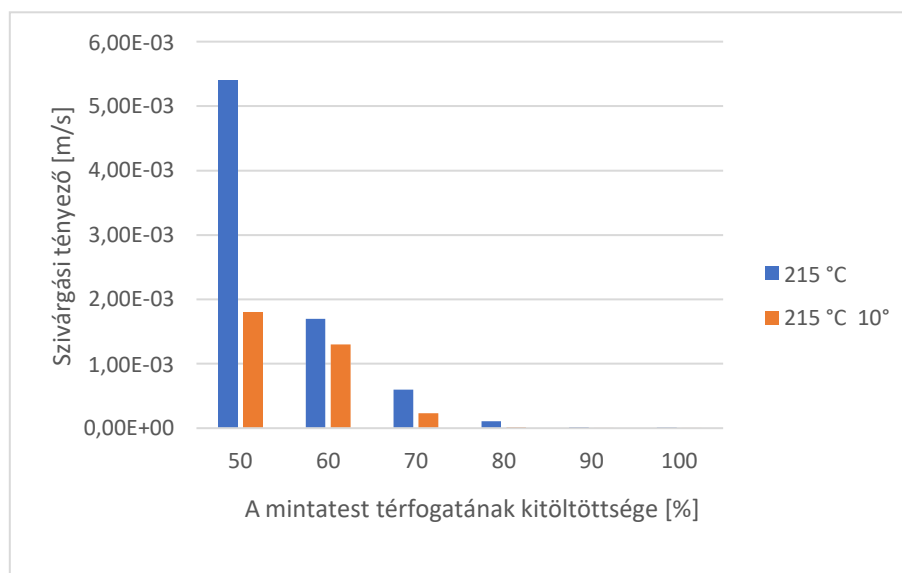
A 13. és 14. ábrán a térfogati kitöltöttség mellett a párhuzamos vonalakkal és 45 fokos kitöltési típus eredményei láthatóak. Az eredményekben leginkább a nagyobb térfogatkitöltöttség esetén jelennek meg markáns eltérések, de ezek elsősorban a fűvóka méretéből eredő nyomtatási hibák, amelyeket akésőbbiekben kisebb fejek alkalmazásával korrigálni kell majd.



14. ábra - Szivárgási tényező változása térfogati kitöltöttség függvényében 45 fokos kitöltés esetén
(saját szerkesztésű ábra)

A 3D mintatestek tervezése és nyomtatása során nem csak a térfogat kitöltöttsége és annak típusa, hanem a kitöltöttség irányultsága is szabályozható, különböző dőlésszögek

megadásával. Ennek köszönhetően ugyanolyan mértékű térfogatkitöltöttség és hőmérséklet mellett is változtatható a mintatest szivárgási tényező értéke, amit a 15. ábra is jól mutat. A nyomtatott rétegek dőlésszögének 10°-os változtatásával a szivárgási tényező értéke azonos térfogatkitöltöttség és porozitás mellett alacsonyabb értéket vesz fel, mint a vízszintes rétegek esetében, ami a megnövekedett szivárgási útvonalaknak köszönhető.



15. ábra - Szivárgási tényező változása térfogati kitöltöttség függvényében 215 °C és párhuzamos vonalak esetén

(saját szerkesztésű ábra)

8 Összefoglalás, jövőbeli célok

Mára a 3D nyomtatás szinte minden iparágban képviselteti magát az autógyártástól az élelmiszeriparig. Előnyét az egyedi tervezhetőség és a nyomtatáshoz alkalmazható anyagok széles választéka adja. Az egyedi tervezhetőségi előnyök adták jelen tanulmány ötletét is, hogy tervezhető porozitású és áteresztő képességű szűrőket hozzunk létre. A kutatás ezen szakaszában elsősorban egyes nyomtatási paraméterek porozításra és áteresztőképességre gyakorolt hatását vizsgáltam. A kezdeti eredmények igazolták, hogy nem csak létjogosultsága, de még számos kiaknázatlan lehetősége is van az ilyen irányú kutatásoknak és fejlesztéseknek.

A kezdeti mérési eredmények is igazolják, hogy 3D nyomtatással előállíthatóak olyan tervezett porozitású, áteresztő képességű mechanikai-kémiai szűrők, amelyek a jövőben alkalmazhatóak lehetnek a víztisztításban és a környezetiparban. Annak érdekében, hogy ezek a rendszerek optimálisan tervezhetőek legyenek, a nyomtatási paraméterek hatásának további laboratóriumi vizsgálata szükséges. Az áteresztőképesség mérések mellett a jövőben a kettős porozitás kialakulásához vezető habosodás jobb megértése érdekében pásztázó elektron mikroszkópos (SEM) felvételek készítése és értékelése jelenthet továbblépést. Továbbá szükséges a már piaconlévő filamentek alkalmazhatóságának vizsgálata, illetve új anyagok adaptálása a 3D nyomtatásba.

9. Köszönetnyilvánítás

A dolgozatomban bemutatott kutatás a Széchenyi Terv Plusz program keretében az RRF-2.3.1-21-2022-00008 számú projekt támogatásával valósult meg.

10. Irodalomjegyzék

- [1] Horváth H. – Kurucz A. (2017): A 3D nyomtatás története és jövőbeli kérdései. In.: Reisinger Adrienn, Kecskés Petra (szerk.): "Ifjúság - jövőképek": Kautz Gyula Emlékkonferencia 2016. június 15. elektronikus formában megjelenő kötete. Széchenyi István Egyetem.
- [2] A. Savini-G. G. Savini (2015): A Short History of 3D Printing, a Technological Revolution Just Started, Conference: 2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference DOI:[10.1109/HISTELCON.2015.7307314](https://doi.org/10.1109/HISTELCON.2015.7307314)
- [3] 3D Systems About Us (2013) 3D Systems. Online: [Our Story | 3D Systems](#)
Letöltés dátuma: 2022.05.10

- [4] Gajdács L. -Szűcs V. (2020): A 3D-nyomtatás gyártástechnológiái, felhasználási területei, illetve az ebben rejlő potenciál, Repüléstudományi Közlemények, 32. évfolyam 1. szám 101–110. • DOI: 10.32560/rk.2020.1.7
- [5] S. El-Sayegh - L. Romdhane - S. Manjikian (2020): A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges, and risks. Archives of Civil and Mechanical Engineering,
- [6] Thakar, C.M.; Parkhe, S.S.; Jain, A.; Phasinam, K.; Murugesan, G.; Ventayen, R.J.M. (2021): 3D printing: Basic principles and applications. Mater. Today Proc.
- [7] [Classification of additive manufacturing technologies based on Wong and... | Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](#)
Letöltés dátuma: 2022.07.12
- [8] Gál B. -Németh A. (2019): Additív gyártástechnológiák katonai alkalmazásának vizsgálata, különös tekintettel a katonai elektronika területére. Hadmérnök, XIV. Évfolyam 1. szám. pp.231-249.
- [9] Kis Katalin (2017) Additív gyártástechnológiával előállítható rugalmas műanyagok vizsgálata. TDK dolgozat.
- [10] N. Shahrubudin; T.C. Lee; R. Ramalan (2019): An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications/ Procedia Manufacturing. Volumae 35., pp: 1286–1296
- [11] O. Sai Saran, A. Prudhvidhar Reddy, L. Chaturya; M. Pavan Kumar (2022): 3Dprinting of composite materials: A short review, Materials Today Materials Today: Proceedings 64(1)
- [12] S. El-Sayegh - L. Romdhane - S. Manjikian (2020): A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges, and risks. Archives of Civil and Mechanical Engineering,

- [13] *R. Ranjan, D. Kumar, M. Kundu; S Chandra Moi (2022): A critical review on Classification of materials used in 3D printing process, Materials Today*
- [14] <https://filaticum.com/termek>; Letöltés dátuma: 2022.05.10.
- [15] D. Zioui et al (2015): Membrane Technology for Water Treatment Application. Digital Proceeding of ICCES. Istanbul.
- [16] L.D. Tijing, J.R.C. Dizon, I. Ibrahim et.al. (2020): 3D printing for membrane separation, desalination and water treatment. Applied Materials Today 18.
- [17] Abdullah Khalil, Farah Ejaz Ahmed, Nidal Hilal (2021): The emerging role of 3D printing in water desalination. Science of the Total Environment 790.
- [18] J.H. Shin, J.-H. Heo, S. Jeon, J.H. Park, S. Kim, H.-W. Kang,(2019): Bio-inspired hollow PDMS sponge for enhanced oil–water separation, J. Hazard. Mater. 365.pp 494–501.
- [19] Abdullah Khalil, Farah Ejaz Ahmed, Nidal Hilal (2021): The emerging role of 3D printing in water desalination. Science of the Total Environment 790.
- [20] Szűcs P.- Szabó I.: Felszín alatti hidraulika, Miskolci Egyetem, Hidrogeológiai-Mérnökgeológiai Tanszék
- [21] Kopecskó K. - Balázs L. Gy (2019): Pásztázó elektronmikroszkópia (SEM) alkalmazása építőmérnöki feladatokban. XXXIII. Nemzetközi építéstudományi konferencia.

11.Mellékletek

1. számú melléklet: A minták tömege különböző kitöltöttség mellett

Szám	Kitöltés					Tömeg [g]
	Típus	Hőmérséklet	Sűrűség/ Szélesség	Sebesség	Fok/ Növekmény	
1_Foam	Párhuzamos von.	215 °C	50% 100%	125%	0% 0%	12,36
2_Foam	Párhuzamos von.	215 °C	60% 100%	125%	0% 0%	14,57
3_Foam	Párhuzamos von.	215 °C	70% 100%	125%	0% 0%	16,87
4_Foam	Párhuzamos von.	215 °C	80% 100%	125%	0% 0%	19,21
5_Foam	Párhuzamos von.	215 °C	90% 100%	125%	0% 0%	21,47
6_Foam	Párhuzamos von.	215 °C	100% 100%	125%	0% 0%	23,79
7_Foam	45 fok	215 °C	50% 100%	125%	0% 0%	12,22
8_Foam	45 fok	215 °C	60% 100%	125%	0% 0%	14,64
9_Foam	45fok	215 °C	70% 100%	125%	0% 0%	16,84
10_Foam	45 fok	215 °C	80% 100%	125%	0% 0%	19,24
11_Foam	45 fok	215 °C	90% 100%	125%	0% 0%	21,47
12_Foam	45 fok	215 °C	100% 100%	125%	0% 0%	23,6
13_Foam	Párhuzamos von.	225°C	50% 100%	125%	0% 0%	12,53
14_Foam	Párhuzamos von.	225°C	60% 100%	125%	0% 0%	14,85
15_Foam	Párhuzamos von.	225°C	70% 100%	125%	0% 0%	17,25
16_Foam	Párhuzamos von.	225°C	80% 100%	125%	0% 0%	19,81
17_Foam	Párhuzamos von.	225°C	90% 100%	125%	0% 0%	21,79
18_Foam	Párhuzamos von.	225°C	100% 100%	125%	0% 0%	23,56
19_Foam	45 fok	225°C	50% 100%	125%	0% 0%	11,95
20_Foam	45 fok	225°C	60% 100%	125%	0% 0%	14,22
21_Foam	45 fok	225°C	70% 100%	125%	0% 0%	16,37
22_Foam	45 fok	225°C	80% 100%	125%	0% 0%	18,41
23_Foam	45 fok	225°C	90% 100%	125%	0% 0%	20,52
24_Foam	45 fok	225°C	100% 100%	125%	0% 0%	22,65
25_Foam	Párhuzamos von.	245°C	50% 100%	125%	0% 0%	12,01
26_Foam	Párhuzamos von.	245°C	60% 100%	125%	0% 0%	14,18
27_Foam	Párhuzamos von.	245°C	70% 100%	125%	0% 0%	16,36
28_Foam	Párhuzamos von.	245°C	80% 100%	125%	0% 0%	18,59
29_Foam	Párhuzamos von.	245°C	90% 100%	125%	0% 0%	20,91
30_Foam	Párhuzamos von.	245°C	100% 100%	125%	0% 0%	23,1
31_Foam	45 fok	245°C	50% 100%	125%	0% 0%	11,83
32_Foam	45 fok	245°C	60% 100%	125%	0% 0%	14,09
33_Foam	45 fok	245°C	70% 100%	125%	0% 0%	16,22
34_Foam	45 fok	245°C	80% 100%	125%	0% 0%	18,52
35_Foam	45 fok	245°C	90% 100%	125%	0% 0%	20,54
36_Foam	45 fok	245°C	100% 100%	125%	0% 0%	22,65
37_Foam	Párhuzamos von.	195°C	50% 100%	125%	0% 0%	12,02
38_Foam	Párhuzamos von.	195°C	60% 100%	125%	0% 0%	14,25
39_Foam	Párhuzamos von.	195°C	70% 100%	125%	0% 0%	16,44
40_Foam	Párhuzamos von.	195°C	80% 100%	125%	0% 0%	18,62
41_Foam	Párhuzamos von.	195°C	90% 100%	125%	0% 0%	20,76
42_Foam	Párhuzamos von.	195°C	100% 100%	125%	0% 0%	22,65
43_Foam	45 fok	195°C	50% 100%	125%	0% 0%	11,59
44_Foam	45 fok	195°C	60% 100%	125%	0% 0%	13,83
45_Foam	45 fok	195°C	70% 100%	125%	0% 0%	15,87
46_Foam	45 fok	195°C	80% 100%	125%	0% 0%	18,13
47_Foam	45 fok	195°C	90% 100%	125%	0% 0%	20,11
48_Foam	45 fok	195°C	100% 100%	125%	0% 0%	21,88

2. számú melléklet: Porozitás és hézagtéynyező különböző kitöltöttség mellett

Szám	Típus	Hőmérséklet	Porozitás	Hézagtéynyező
1_Foam	Párhuzamos von.	215 °C	0,5135	1,0555
2_Foam	Párhuzamos von.	215 °C	0,4265	0,7437
3_Foam	Párhuzamos von.	215 °C	0,336	0,506
4_Foam	Párhuzamos von.	215 °C	0,2439	0,3225
5_Foam	Párhuzamos von.	215 °C	0,1549	0,1833
6_Foam	Párhuzamos von.	215 °C	0,0636	0,0679
7_Foam	45 fok	215 °C	0,519	1,079
8_Foam	45 fok	215 °C	0,4238	0,7354
9_Foam	45fok	215 °C	0,3372	0,5087
10_Foam	45 fok	215 °C	0,2427	0,3207
11_Foam	45 fok	215 °C	0,1549	0,1833
12_Foam	45 fok	215 °C	0,0711	0,0765
13_Foam	Párhuzamos von.	225°C	0,5068	1,0276
14_Foam	Párhuzamos von.	225°C	0,4155	0,7108
15_Foam	Párhuzamos von.	225°C	0,321	0,4728
16_Foam	Párhuzamos von.	225°C	0,2203	0,2825
17_Foam	Párhuzamos von.	225°C	0,1423	0,166
18_Foam	Párhuzamos von.	225°C	0,0727	0,0783
19_Foam	45 fok	225°C	0,5296	1,126
20_Foam	45 fok	225°C	0,4403	0,7866
21_Foam	45 fok	225°C	0,3557	0,552
22_Foam	45 fok	225°C	0,2754	0,3799
23_Foam	45 fok	225°C	0,1923	0,2381
24_Foam	45 fok	225°C	0,1085	0,1217
25_Foam	Párhuzamos von.	245°C	0,5273	1,1154
26_Foam	Párhuzamos von.	245°C	0,4201	0,7245
27_Foam	Párhuzamos von.	245°C	0,3561	0,553
28_Foam	Párhuzamos von.	245°C	0,2683	0,3666
29_Foam	Párhuzamos von.	245°C	0,177	0,215
30_Foam	Párhuzamos von.	245°C	0,0908	0,0998
31_Foam	45 fok	245°C	0,5344	1,1476
32_Foam	45 fok	245°C	0,4454	0,8031
33_Foam	45 fok	245°C	0,3616	0,5663
34_Foam	45 fok	245°C	0,271	0,3718
35_Foam	45 fok	245°C	0,1915	0,2369
36_Foam	45 fok	245°C	0,1085	0,1217
37_Foam	Párhuzamos von.	195°C	0,5269	1,1136
38_Foam	Párhuzamos von.	195°C	0,4391	0,7829
39_Foam	Párhuzamos von.	195°C	0,3529	0,5454
40_Foam	Párhuzamos von.	195°C	0,2671	0,3644
41_Foam	Párhuzamos von.	195°C	0,1829	0,2338
42_Foam	Párhuzamos von.	195°C	0,1085	0,1217
43_Foam	45 fok	195°C	0,5438	1,192
44_Foam	45 fok	195°C	0,4556	0,837
45_Foam	45 fok	195°C	0,3753	0,6009
46_Foam	45 fok	195°C	0,2864	0,4013
47_Foam	45 fok	195°C	0,2084	0,2633
48_Foam	45 fok	195°C	0,1388	0,1611

3. számú melléklet: 1. számú melléklet: Szivárgási tényező különböző kitöltöttség mellett

Szám	Típus	Hőmérséklet	Szivárgási tényező [m/d]	Szivárgási tényező[m/s]
1_Foam	Párhuzamos von.	215 °C	4,63E+02	5,40E-03
2_Foam	Párhuzamos von.	215 °C	1,45E+02	1,70E-03
3_Foam	Párhuzamos von.	215 °C	5,16E+01	6,00E-04
4_Foam	Párhuzamos von.	215 °C	9,58E+00	1,10E-04
5_Foam	Párhuzamos von.	215 °C	1,73E+00	2,00E-05
6_Foam	Párhuzamos von.	215 °C	1,33E+00	1,54E-05
7_Foam	45 fok	215 °C	4,56E+02	5,30E-03
8_Foam	45 fok	215 °C	3,77E+02	4,40E-03
9_Foam	45fok	215 °C	3,56E+02	4,10E-03
10_Foam	45 fok	215 °C	2,73E+02	3,20E-03
11_Foam	45 fok	215 °C	1,47E+02	1,70E-03
12_Foam	45 fok	215 °C	8,40E+01	9,70E-04
13_Foam	Párhuzamos von.	225°C	4,47E+02	5,20E-03
14_Foam	Párhuzamos von.	225°C	1,65E+02	1,90E-03
15_Foam	Párhuzamos von.	225°C	1,78E+01	2,10E-04
16_Foam	Párhuzamos von.	225°C	1,02E+01	1,20E-04
17_Foam	Párhuzamos von.	225°C	6,72E-01	7,78E-06
18_Foam	Párhuzamos von.	225°C	6,68E-01	7,73E-06
19_Foam	45 fok	225°C	4,41E+02	5,10E-03
20_Foam	45 fok	225°C	4,15E+02	4,80E-03
21_Foam	45 fok	225°C	3,95E+02	4,60E-03
22_Foam	45 fok	225°C	2,61E+02	3,00E-03
23_Foam	45 fok	225°C	1,45E+02	1,70E-03
24_Foam	45 fok	225°C	1,09E+02	1,30E-03
25_Foam	Párhuzamos von.	245°C	4,54E+02	5,30E-03
26_Foam	Párhuzamos von.	245°C	3,78E+02	4,40E-03
27_Foam	Párhuzamos von.	245°C	9,79E+01	1,10E-03
28_Foam	Párhuzamos von.	245°C	1,77E+01	2,10E-04
29_Foam	Párhuzamos von.	245°C	2,47E+00	2,86E-05
30_Foam	Párhuzamos von.	245°C	1,81E+00	2,09E-05
31_Foam	45 fok	245°C	4,67E+02	5,40E-03
32_Foam	45 fok	245°C	4,48E+02	5,20E-03
33_Foam	45 fok	245°C	4,41E+02	5,10E-03
34_Foam	45 fok	245°C	3,14E+02	1,80E-03
35_Foam	45 fok	245°C	1,57E+02	1,80E-03
36_Foam	45 fok	245°C	7,75E+01	9,00E-04
37_Foam	Párhuzamos von.	195°C	4,48E+02	5,20E-03
38_Foam	Párhuzamos von.	195°C	3,08E+02	3,60E-03
39_Foam	Párhuzamos von.	195°C	4,80E+01	5,60E-04
40_Foam	Párhuzamos von.	195°C	1,46E+01	1,70E-04
41_Foam	Párhuzamos von.	195°C	1,89E+00	2,19E-05
42_Foam	Párhuzamos von.	195°C	1,85E+00	2,14E-05
43_Foam	45 fok	195°C	4,68E+02	5,40E-03
44_Foam	45 fok	195°C	4,48E+02	5,20E-03
45_Foam	45 fok	195°C	4,40E+02	5,10E-03
46_Foam	45 fok	195°C	3,29E+02	3,80E-03
47_Foam	45 fok	195°C	2,16E+02	2,50E-03
48_Foam	45 fok	195°C	1,48E+02	1,70E-03

4. számú melléklet: Nyomtatás során felhasznált anyag hossza különböző kitöltöttség mellett

Szám	Típus	Hőmérséklet	Felhasznált anyag hossz
1_Foam	Párhuzamos von.	215 °C	5,7
2_Foam	Párhuzamos von.	215 °C	6,7
3_Foam	Párhuzamos von.	215 °C	7,7
4_Foam	Párhuzamos von.	215 °C	8,7
5_Foam	Párhuzamos von.	215 °C	9,7
6_Foam	Párhuzamos von.	215 °C	10,7
7_Foam	45 fok	215 °C	5,6
8_Foam	45 fok	215 °C	6,7
9_Foam	45fok	215 °C	7,6
10_Foam	45 fok	215 °C	8,6
11_Foam	45 fok	215 °C	9,6
12_Foam	45 fok	215 °C	10,5
13_Foam	Párhuzamos von.	225°C	5,7
14_Foam	Párhuzamos von.	225°C	6,7
15_Foam	Párhuzamos von.	225°C	7,7
16_Foam	Párhuzamos von.	225°C	8,7
17_Foam	Párhuzamos von.	225°C	9,7
18_Foam	Párhuzamos von.	225°C	10,7
19_Foam	45 fok	225°C	5,6
20_Foam	45 fok	225°C	6,7
21_Foam	45 fok	225°C	7,6
22_Foam	45 fok	225°C	8,6
23_Foam	45 fok	225°C	9,8
24_Foam	45 fok	225°C	10,5
25_Foam	Párhuzamos von.	245°C	5,7
26_Foam	Párhuzamos von.	245°C	6,7
27_Foam	Párhuzamos von.	245°C	7,7
28_Foam	Párhuzamos von.	245°C	8,7
29_Foam	Párhuzamos von.	245°C	9,7
30_Foam	Párhuzamos von.	245°C	10,7
31_Foam	45 fok	245°C	5,6
32_Foam	45 fok	245°C	6,7
33_Foam	45 fok	245°C	7,6
34_Foam	45 fok	245°C	8,6
35_Foam	45 fok	245°C	9,6
36_Foam	45 fok	245°C	10,5
37_Foam	Párhuzamos von.	195°C	5,7
38_Foam	Párhuzamos von.	195°C	6,7
39_Foam	Párhuzamos von.	195°C	7,7
40_Foam	Párhuzamos von.	195°C	8,7
41_Foam	Párhuzamos von.	195°C	9,7
42_Foam	Párhuzamos von.	195°C	10,7
43_Foam	45 fok	195°C	5,6
44_Foam	45 fok	195°C	6,7
45_Foam	45 fok	195°C	7,6
46_Foam	45 fok	195°C	8,6
47_Foam	45 fok	195°C	9,6
48_Foam	45 fok	195°C	10,5